

УДК 665.658.6

Investigation of the Properties of Semisynthetic Oils Obtained in the Presence of Dispersed Catalysts Based on Mo and Fe-Co in the Process of Catalytic Steam Cracking of Vacuum Residue

**Olesya O. Zaikina^{a,b}, Anastasiia V. Saiko^a,
Gleb A. Sosnin^{*a,b}, Peter M. Yeletsky^a,
Yuliya K. Gulyaeva^{a,b}, Oleg V. Klimov^a,
Aleksander S. Noskov^a and Vadim A. Yakovlev^{a,b}**

*^aBoriskov Institute of Catalysis SB RAS
5 Akademika Lavrentieva, Novosibirsk, 630090, Russia*

*^bNovosibirsk State University
1 Pirogova Str., Novosibirsk, 630090, Russia*

Received 02.09.2019, received in revised form 17.09.2019, accepted 19.10.2019

A comparative study of dispersed catalysts obtained in-situ on the basis of Mo and Fe-Co in the process of catalytic steam cracking of vacuum residue in the slurry-reactor was conducted (water : vacuum residue = 0,1 : 1 ratio, temperature – 450 °C, pressure – 2,0 MPa, feed rate – 0.1 kg/h). Samples of the semisynthetic oil were obtained and characterized. In the rectification process the gasoline, diesel, oil and residual fractions were allocated. A complex of physicochemical methods was applied to the analysis of light and dark petroleum products. Based on the obtained data the performance properties of the studied fractions were compared. The relationship between the redistribution of components within the fractions and the catalytic properties of dispersed catalysts was established. The efficiency of using Fe-Co catalysts to produce semisynthetic oil with an increased content of light fractions in the process of catalytic steam cracking of vacuum residue is shown.

Keywords: heavy petroleum feedstocks, vacuum residue, semisynthetic oil, dispersed catalyst, steam cracking, slurry-reactor.

Citation: Zaikina O.O., Saiko A.V., Sosnin G.A., Yeletsky P.M., Gulyaeva Yu.K., Klimov O.V., Noskov A.S., Yakovlev V.A. Investigation of the properties of semisynthetic oils obtained in the presence of dispersed catalysts based on Mo and Fe-Co in the process of catalytic steam cracking of vacuum residue, J. Sib. Fed. Univ. Chem., 2019, 12(4), 512-521. DOI: 10.17516/1998-2836-0147.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: sosningleb@catalysis.ru

Исследование свойств полусинтетических нефтей, полученных в присутствии дисперсных катализаторов на основе Мо и Fe-Co в процессе каталитического парового крекинга гудрона

**О.О. Заикина^{а,б}, А.В. Сайко^а,
Г.А. Соснин^{а,б}, П.М. Елецкий^а, Ю.К. Гуляева^{а,б},
О.В. Климов^а, А.С. Носков^а, В.А. Яковлев^{а,б}**

*^аИнститут катализа им. Г.К. Борескова СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5
^бНовосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1*

Проведено сравнительное исследование дисперсных катализаторов, полученных в режиме in-situ на основе Мо и Fe-Co в процессе каталитического парового крекинга гудрона (соотношение вода : гудрон = 0,1 : 1, температура 450 °С, давление 2,0 МПа, скорость подачи гудрона 0,1 кг/ч) в сларри-реакторе. Были получены и охарактеризованы образцы полусинтетической нефти. В процессе ректификации были выделены бензиновая, дизельная, масляная и остаточная фракции. К анализу светлых и темных нефтепродуктов был применен комплекс физико-химических методов. На основании выявленных данных проведено сравнение эксплуатационных характеристик изученных фракций, а также установлена связь между перераспределением компонентов внутри фракций и каталитическими свойствами дисперсных катализаторов. Показана эффективность использования Fe-Co-катализаторов для получения полусинтетической нефти с увеличенным содержанием светлых фракций в процессе каталитического парового крекинга гудрона.

Ключевые слова: тяжелое нефтяное сырье, гудрон, полусинтетическая нефть, дисперсный катализатор, паровой крекинг, сларри-реактор.

Введение

В связи с увеличением мировой потребности в моторных топливах существенно возрастает необходимость использования в нефтепереработке нетрадиционного тяжелого нефтяного сырья (ТНС), включающего в себя тяжелые нефти, природные битумы, тяжелые остаточные нефтяные фракции (гудрон, мазут), битуминозные пески и горючие сланцы. Традиционные подходы по переработке ТНС можно разделить на два типа: процессы, основанные на снижении содержания углерода в сырье или насыщении его водородом, либо их комбинирование [1]. К первому типу можно отнести деасфальтизацию, термические процессы: газификация, коксование (замедленное, флексикокинг и др.), висбрекинг и каталитический крекинг, ко второму – гидрогенизационные процессы.

В настоящее время одним из активно развиваемых направлений, которое совмещает преимущества термо- и гидропроцессов облагораживания, является каталитический паровой крекинг тяжелого нефтяного сырья [2, 3]. В данном процессе вода выступает в качестве донора водорода, участие которого в процессе позволяет повысить выход светлых фракций (н.к. – 360 °С), снизить выход кокса, содержание серы и других гетероатомов в составе жидких продуктов. Использование катализаторов на основе Ni [4, 5], Fe [6, 7], Mo [4, 8], Co [9], Zr [10, 11] в процессе каталитического парового крекинга способствует более глубокому взаимодействию ТНС с водой, включая процессы парциального окисления, низкотемпературного парциального парового риформинга и каталитического крекинга, тем самым существенно повышая эффективность процесса в целом.

Целью данной работы является изучение влияния Fe-Co-каталитической системы на выход и свойства жидких продуктов облагораживания гудрона в сларри-реакторе (при 450 °С и давлении 2,0 МПа) в сравнении с монометаллическим молибденсодержащим дисперсным катализатором, выбор наиболее активной каталитической композиции, которая позволит получить полусинтетическую нефть с наибольшим содержанием светлых фракций. Для оценки качества получаемых фракций необходимо было всесторонне изучить свойства выделенных в процессе ректификации нефтяных фракций. На основании результатов исследования светлых фракций, полученных в процессе каталитического парового крекинга гудрона, необходимо оценить возможность их дальнейшего использования для получения компонентов моторных топлив.

Экспериментальная часть

Свойства используемого гудрона

При проведении экспериментов использовали гудрон западно-сибирской нефти АО «Газпромнефть-ОНПЗ» с высоким содержанием серы (1,8 мас. %), плотностью 960 кг/м³ (60 °С), вязкостью 6712,5 сСт (60 °С), состоящий из углеводородных фракций с температурой кипения выше 500 °С.

Методика приготовления катализаторов

Дисперсный катализатор на основе различных металлов формируется *in situ* в горячей зоне реактора из приготовленной ранее обратной эмульсии водного раствора прекурсора катализатора гудроне. Методика приготовления обратной эмульсии заключается в равномерном диспергировании соответствующего количества водного раствора предшественника катализатора (парамолибдат аммония, хлорид кобальта, сульфат железа II) в нагретом до 80 °С гудроне. Диспергирование осуществляли с использованием диспергатора IKA T-25 basic ULTRA-TURRAX при скорости перемешивания 24000 об/мин в течение 3 мин.

Методика проведения экспериментов по каталитическому паровому крекингу

Исследование каталитического парового крекинга гудрона проводили на установке с проточным реактором типа сларри при температуре 450 °С и давлении 2,0 МПа. Внутренний диаметр реактора 20 мм, длина 300 мм. Подачу обратной эмульсии со скоростью 100 мл/ч осу-

ществляли с помощью термостатируемого до 60 °С поршня. В реактор также подавали аргон со скоростью 100 мл/мин для достижения общего давления в системе 2,0 МПа.

Содержание серы, азота и соотношение H:C в исходном гудроне и продуктах его переработки определяли на CHNS-O-анализаторе VARIO EL CUBE (Elementar Analysen systeme).

Фракционный состав устанавливали методом имитированной дистилляции на газовом хроматографе Agilent 7890B по ASTM D7169 для исходного гудрона, полусинтетической нефти и по ASTM D2887 для выделенных светлых фракций (н.к. – 360 °С). В качестве стандартного вещества для определения степени извлечения использовали вакуумный газойль.

Плотность и кинематическую вязкость исходного гудрона и продуктов его переработки измеряли на вискозиметре Штабингера по стандарту ASTM D7042.

Коксуемость исходного гудрона и полусинтетической нефти проводили методом Конрадсона в соответствии с ГОСТ 19932-99.

Групповой состав исходного гудрона, полусинтетической нефти определяли в соответствии с ГОСТ 11868-66 адсорбционно-хроматографическим методом после выделения асфальтенов в н-гексане с использованием аппарата Сокслета.

Содержание металлов исходного гудрона и продуктов его переработки находим на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL Perform'X.

Содержание ароматических углеводородов в дизельных фракциях выявляли на ВЭЖХ-хроматографе Agilent 1260 Infinity по ASTM D6591. Для идентификации алифатических соединений использовали метод двумерной газовой хроматографии Agilent 7890A.

Групповой состав и октановое число (ОЧ) бензиновых фракций определяли методом капиллярной газовой хроматографии в соответствии с ГОСТ Р 52714-2007. *Цетановый индекс (ЦИ)* дизельных фракций устанавливали расчетным методом по ASTM D473.

Количество олефинов в бензиновых и дизельных фракциях рассчитывали методом йодных чисел в соответствии с ГОСТ 2070-82.

Температуру застывания дизельных фракций определяли с использованием аппарата ЛАЗ-М в соответствии с ГОСТ 20287-91.

Ректификацию полусинтетических нефтей проводили последовательно с помощью установки, соответствующей по техническим характеристикам стандартизированному аппарату АРН-2 по ГОСТ 11011-85. В результате фракционного разделения выделяли из полусинтетической нефти бензиновую, дизельную, масляную и остаточную фракции.

Результаты и обсуждение

Ранее в работе [12] были проведены исследования по изучению особенностей каталитического парового крекинга гудрона при 450 °С в присутствии дисперсных катализаторов на основе различных металлов (Mo, Co, Al, Ni, Fe); на основании полученных результатов был сделан вывод о том, что наиболее подходящей каталитической композицией является сочетание обессеривающей компоненты (молибден) и крекирующей (железо) [8, 13].

В данной работе были проведены эксперименты по получению Mo-Fe-дисперсных катализаторов *in situ* в гудроне. Однако при приготовлении совместной эмульсии водорастворимых предшественников (парамолибдат аммония и сульфат железа (II)) наблюдается образование нерастворимого в воде осадка – парамолибдата железа, что не позволяет получить дисперс-

ные частицы катализатора даже при последовательном введении прекурсоров ввиду высокой подвижности водных пулов в разогретом гудроне. Поэтому в качестве обессеривающей компоненты в каталитической композиции был выбран кобальт как наиболее приближенный по свойствам к молибдену катализатор [12].

В результате проведения экспериментов по каталитическому паровому крекингу гудрона в сларри-реакторе (температура 450 °С, давление 2,0 МПа, содержание металла 0,5 мас. %, соотношение вода : гудрон= 0,1 : 1) были получены данные о влиянии Fe-Co на выход и состав полусинтетической нефти в сравнении с монометаллической молибденовой системой. Оценку эффективности использования дисперсных катализаторов в изучаемом процессе проводили по совокупности параметров, перечисленных в табл. 1.

По данным табл. 1 видно, что использование Мо-содержащего дисперсного катализатора в процессе каталитического парового крекинга гудрона позволяет при выходе жидких продуктов (86,5 мас. %) увеличить выход светлых фракций до 23,0 мас. %, снизить содержание серы до 1,28 мас. %. В ходе исследования свойств продуктов каталитического парового крекинга гудрона в присутствии 0,25/0,25 мас. % Fe и Co было обнаружено, что использование данной каталитической системы приводит к увеличению выхода светлых фракций (до 25,7 мас. %) с одновременным снижением содержания серы (до 1,25 мас. %) при высоком выходе жидких продуктов (85,1 %) и низком коксообразовании (4,1 %). Использование 0,5/0,5 Fe-Co-каталитической системы приводит к некоторому суммарному эффекту, т.е. к увеличению выхода светлых фракций (до 29,9 мас. %) с одновременным снижением содержания серы (до

Таблица 1. Выход и состав продуктов каталитического парового крекинга гудрона в присутствии различных дисперсных катализаторов на основе Мо и Fe-Co

Table 1. Yield and composition of products of catalytic steam cracking of vacuum residue in the presence various dispersed catalysts based on Mo and Fe-Co

| Параметры | Гудрон | КПК | | |
|---|-------------|------------|------------------|----------------|
| | | 0,5 мас. % | 0,25/0,25 мас. % | 0,5/0,5 мас. % |
| Выход фракций, мас. % | | Мо | Fe-Co | Fe-Co |
| Газообразные продукты, мас. % | — | 6,4 | 5,8 | 6,2 |
| Бензиновая н.к. – 200 °С | 0 | 10,3 | 10,3 | 12,5 |
| Дизельная 200-360 °С | 0 | 12,7 | 15,5 | 17,4 |
| Масляная 360-500 °С | 5 | 15,6 | 15,6 | 16,0 |
| Остаточные 500+ °С | 95 | 47,9 | 44,2 | 41,2 |
| Кокс | — | 3,0 | 4,1 | 4,8 |
| Светлые фракции (н.к. – 360 °С) | 0 | 23,0 | 25,7 | 29,9 |
| Выход ГПСН, мас. % | — | 86,5 | 87,5 | 87,1 |
| Потери, мас. % | | 4,1 | 2,7 | 1,9 |
| Содержание S в ГПСН, мас. % | 1,8 | 1,28 | 1,25 | 1,19 |
| Соотношение Н : С в ПСН | 1,57 | 1,56 | 1,58 | 1,59 |
| Плотность ГПСН, кг/м ³ (25 °С) | 960 (60 °С) | 940 | 925 | 920 |
| Вязкость ГПСН, сСт (60 °С) | 6712,5 | 62 | 80 | 75 |
| Конверсия C ₅₀₀₊ , % | — | 41,7 | 42,0 | 50,2 |

1,19 мас. %) при сравнительно высоком выходе жидких продуктов (87,1 %) и низком коксообразовании (4,8 мас. %). Таким образом, по совокупности показателей каталитического парового крекинга оптимальным является использование 0,5 мас. % Fe- Co-дисперсной каталитической системы при температуре 450 °С и давлении 2,0 МПа.

Для полусинтетических нефтей, полученных в присутствии Мо и Fe-Co-дисперсных катализаторов, были определены следующие параметры: содержание металлов, коксуемость по Конрадсону и групповой состав. Было установлено снижение вязкости и плотности продуктов облагораживания по сравнению с исходным гудроном, что коррелирует со смещением фракционного состава в более низкотемпературную область. Также наблюдается снижение содержания серы (с 1,8 до 1,19 – 1,28 мас. %), коксуемости по Конрадсону (с 19,6 до 14,3 – 10,2 мас. %) при практически неизменном соотношении Н/С ($\approx 1,57$) в жидких продуктах.

Использование дисперсных катализаторов на основе Мо и Fe-Co в процессе КПК гудрона позволяет снизить количество спиртобензольных смол (с 27,5 до 9,2 – 11,2 мас. %) при увеличении содержания насыщенных углеводородов (с 27,4 до 39,7 – 45,1 мас. %) и практически неизменном содержании ароматических соединений (28 – 33 мас. %) в продуктах облагораживания (рис. 1). Однако стоит отметить незначительное увеличение содержания асфальтенов по сравнению с исходным сырьем в случае Fe-Co-содержащего катализатора (с 5,1 до 6,1 мас. %) и увеличение с 5,1 до 12,1 мас. % в случае Мо-содержащего дисперсного катализатора, что, вероятнее всего, связано с гидрирующей способностью используемых катализаторов. В процессе КПК гудрона происходит значительный рост содержания насыщенных углеводородов при несущественном увеличении ароматических УВ с ростом количества асфальтенов и значительным снижением смолистых компонентов (рис. 1). Наблюдаемое изменение группового состава ПСН, а также снижение их плотности и вязкости можно объяснить деструкцией смол с образованием парафинонафтенных углеводородов, перераспределением водорода и рекомбинацией образующихся свободных радикалов, а также интенсификацией процессов конденса-

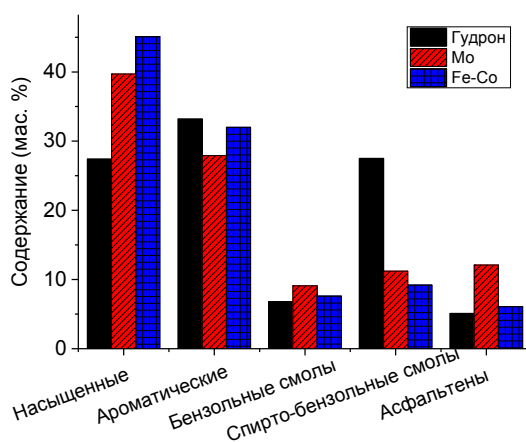


Рис. 1. Групповой состав полусинтетических нефтей, полученных в ходе каталитического парового крекинга гудрона в присутствии Мо- и Fe-Co-дисперсных катализаторов

Fig. 1. The group composition of the semisynthetic oils obtained during catalytic steam cracking of vacuum residue in the presence of Mo- and Fe-Co-dispersed catalysts

ции высокомолекулярных УВ и др. [8, 13]. При высоких температурах процесса интенсифицируются реакции крекинга, гидрогенолиза связей C-S, C-N, C-O, гидрирование углеводородов и т.д., позволяющие получать полусинтетические нефти с повышенным содержанием светлых дистиллятов. Однако имеют место и процессы конденсации углеводородных радикалов с образованием асфальтенов. Наблюдаемый характер превращений гудрона в полусинтетические нефти, вероятно, связан с недостатком водорода в процессе каталитического парового крекинга [14].

Полусинтетические нефти, полученные в процессе КПК гудрона в присутствии Mo- и Fe-Co-содержащих дисперсных катализаторов, были разделены на нефтяные фракции в процессе ректификации. Светлые фракции были проанализированы физико-химическими методами на ряд эксплуатационных характеристик, позволяющих оценить качество светлых фракций.

В ходе физико-химических исследований бензиновых фракций не было выявлено существенных отличий между Mo- и Fe-Co-содержащими дисперсными катализаторами. Во всех случаях плотность продуктов составляет приблизительно 760 кг/м³ с вязкостью 0,78 сСт (при 15 °С), октановое число – 70 пунктов по ИМ, что согласуется со схожим фракционным и групповым составами бензиновых фракций (рис. 2А). Для бензиновых фракций, полученных при КПК в присутствии Fe-Co-каталитической системы, отмечено меньшее содержание олефинов по сравнению с молибденом (5,4 и 6,3 мас. % соответственно). В процессе КПК гудрона для этих бензиновых фракций отмечено высокое содержание парафинов (21-24,6 мас. %) и низкое содержание ароматических соединений (с 17-18 мас. %), количество изопарафинов равно 27-26 мас. % и нафтенос – 12-17 мас. %. Состав бензиновых фракций, полученных после процесса каталитического парового крекинга гудрона, характеризуется низким содержанием высокооктановых компонентов – изопарафинов и ароматических УВ, а также высоким содержанием непредельных соединений, которые отрицательно влияют на эксплуатационные свойства, поэтому значение ОЧ не выше 70. При оценке влияния группо-

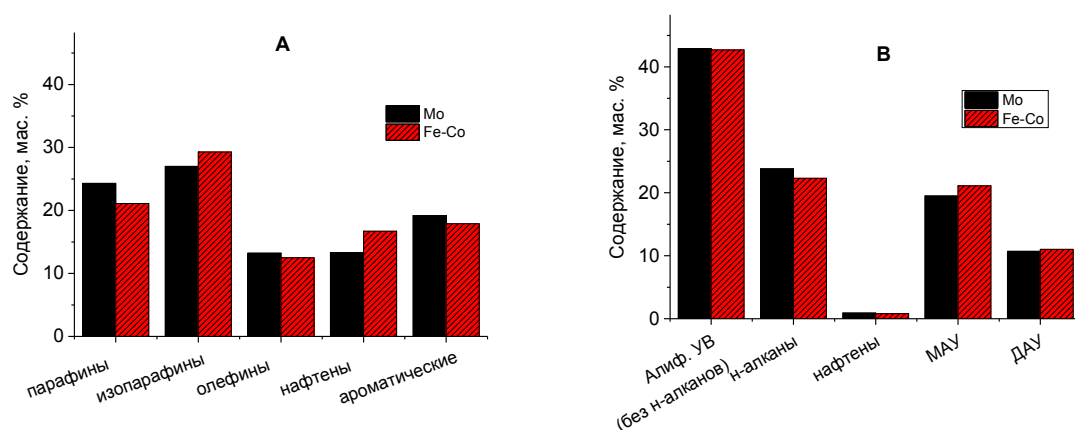


Рис. 2. Групповой состав бензиновых (А) и дизельных (В) фракций, полученных из полусинтетических нефтей с Mo- и Fe-Co-дисперсными катализаторами

Fig. 2. The group composition of gasoline (A) and diesel (B) fractions obtained from semisynthetic oils with Mo- and Fe-Co-dispersed catalysts

вого состава на октановое число необходимо учитывать не только класс углеводородов, но и индивидуальные компоненты.

По аналогии с бензиновыми фракциями в ходе физико-химических исследований дизельных фракций, полученных при облагораживания гудрона, не было выявлено существенных отличий между Mo- и Fe-Co-содержащими дисперсными катализаторами в свойствах вышеуказанных фракций (табл. 2).

Во всех случаях плотность продуктов равняется приблизительно 870 кг/м^3 с вязкостью 7,28 сСт (при 15°C), ЦИ составил около 44 пунктов, что согласуется также с сопоставимым фракционным составом и схожим групповым составом дизельных фракций (рис. 2B). При исследовании группового состава дизельных фракций после КПК было обнаружено, что содержание изоалканов составляет $\sim 43 \text{ мас. \%}$ и ароматических соединений $\sim 34 \text{ мас. \%}$, при этом количество н-алканов равно $\sim 23 \text{ мас. \%}$, незначительном содержание нафтен (0,9 мас. %) (рис. 2B).

Подобные изменения группового состава дизельных фракций каталитического парового крекинга гудрона в присутствии Mo- и Fe-Co-содержащего дисперсного катализатора обуславливают увеличение температуры замерзания (с минус 21 до минус 23°C) и значение цетанового индекса ~ 44 (табл. 2). В дизельных фракциях н-парафины влияют на эксплуатационные свойства, обеспечивая необходимое значение цетанового индекса, но также могут влиять на низкотемпературные свойства, например повышать температуру застывания (T_z) [15, 16]. Цетановый индекс определяется в исследуемых фракциях в большей степени содержанием н-алканов и изоалканов (23 и 43 мас. % соответственно), а также и ароматических углеводородов (34 мас. %). Значения вязкости и плотности полученных фракций можно объяснить высоким содержанием насыщенных и изомеризованных углеводородов. Для бензиновых и дизельных фракций отмечено высокое содержание серы (табл. 2) относительно полученных полусинтетических нефтей. Данный эффект связан с перераспределением между фракциями серосодержащих соединений различного строения и температурами их кипения, а также выходом дистиллятных фракций.

На основании изученных физико-химических свойств можно заключить, что полученные из гудрона в процессе каталитического парового крекинга дизельные фракции, благо-

Таблица 2. Характеристики бензиновых и дизельных фракций, полученных из полусинтетических нефтей с Mo- и Fe-Co-дисперсными катализаторами

Table 2. Characteristics of gasoline and diesel fractions obtained from semisynthetic oils with Mo- and Fe-Co dispersed catalysts

| Параметры | БФ | | ДФ | |
|--|------|-------|------|-------|
| | Mo | Fe-Co | Mo | Fe-Co |
| Плотность при 15°C , кг/м^3 | 756 | 761 | 868 | 870 |
| Кинематическая вязкость при 15°C , сСт | 0,78 | 0,81 | 6,8 | 7,3 |
| Содержание серы, мас. % | 0,7 | 0,5 | 1,95 | 1,90 |
| Содержание олефинов, мас. % | 6,3 | 5,4 | 1,5 | 0,7 |
| $\text{ОЧ}_{\text{им}}/\text{ЦИ}$ | 70,5 | 70,1 | 44,6 | 44,0 |
| Соотношение H : C | 2,02 | 2,02 | 1,84 | 1,90 |

даря данному групповому составу, вязкости, плотности и высокому значению цетанового индекса, обладают большим потенциалом при дальнейшей переработке и компаундировании с получением товарных дизельных топлив. Бензиновые фракции после предварительной гидроочистки также могут быть вовлечены в процессы получения компонентов моторных топлив.

При изучении процесса каталитического парового крекинга гудрона в проточном сларри-реакторе были определены основные физико-химические закономерности протекания данного процесса. При этом снижение содержания серы в полусинтетической нефти протекает за счет каталитического обессеривания с образованием серосодержащих газообразных продуктов (преимущественно сероводород [8]), и ее перераспределение между углеводородными фракциями коррелирует с увеличением температуры кипения.

Заключение

Изучены особенности каталитического парового крекинга гудрона при 450 °С и давлении 2,0 МПа в присутствии Mo- и Fe-Co-дисперсных катализаторов. По совокупности параметров наиболее перспективным для получения полусинтетической нефти с высоким содержанием светлых фракций (29,9 мас. %) является дисперсный катализатор на основе Fe-Co. При исследовании группового состава ПСН обнаружено, что проведение процесса КПК гудрона приводит к увеличению насыщенных углеводородов и снижению смолистых компонентов, а также незначительному увеличению асфальтенов, что связано, по-видимому, с гидрирующей и крекирующей способностью используемых Mo- и Fe-Co-дисперсных катализаторов. Было показано, что бензиновые фракции КПК гудрона характеризуются относительно невысокой плотностью (~ 0,760 г/см³), низким октановым числом (70 по ИМ), а также содержанием серы (~0,7 мас. %), ароматических УВ различного строения (~19 мас. %), олефинов (5–6 мас. %) и парафинов (~24 мас. %), недостаточным количеством изопарафинов (~28 мас. %). Дизельные фракции характеризуются повышенной плотностью (~0,870 г/см³) вследствие высокого содержания высококипящих УВ, пониженным значением цетанового индекса (~44), а также высоким содержанием серы (~1,9 мас. %), ароматических УВ различного строения: МАУ около 20 мас. %, ДАУ около 11 мас. %, ТАУ + ПАУ около 2 мас. %. Можно заключить, что для дальнейшего вовлечения данных светлых фракций в инфраструктуру вторичных процессов нефтепереработки требуется их предварительное гидрооблагораживание с целью улучшения эксплуатационных характеристик, что в конечном итоге позволит расширить сырьевую базу для получения компонентов моторных топлив.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: соглашение № 14.607.21.0172, идентификационный номер соглашения RFMEFI60717X0172.

Список литературы

1. A Ancheyta J. Speight J.G. Hydroprocessing of heavy oils and residua. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2007. 335 p.

2. Eletsii P.M., Mironenko O.O., Kukushkin R.G., Sosnin G.A., Yakovlev V.A. Catalytic steam cracking of heavy oil feedstocks: a review. *Catalysis in Industry* 2018, Vol. 10(3), P. 185–201.
3. Eletsii P.M., Sosnin G.A., Zaikina O.O., Kukushkin R.G., Yakovlev V. Heavy oil upgrading in the presence of water. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* 2018, Vol. 10(4), P. 545–572.
4. Reina T.R., Yeletsky P., Bermúdez J.M., Arcelus-Arrillaga P., Yakovlev V.A., Millan M. Anthracene aquacracking using NiMo/SiO₂ catalysts in supercritical water conditions. *Fuel* 2016, Vol. 182, P. 740–748.
5. Cabrales-Navarro F. A., Pereira-Almao P. Catalytic steam cracking of a deasphalted vacuum residue using a Ni/K ultradispersed catalyst. *Energy and Fuels* 2017, Vol. 31(3), P. 3121–3131.
6. Kukushkin R.G., Eletsii P.M., Zaikina O.O., Sosnin G.A., Bulavchenko O.A., Yakovlev V.A. Studying the steam cracking of heavy oil over iron- and molybdenum-containing dispersed catalysts in a flow-type reactor. *Catalysis in Industry* 2018, Vol. 10(4), P. 344–352.
7. Clark P.D., Kirk M.J. Studies on the upgrading of bituminous oils with water and transition metal catalysts. *Energy and Fuels* 1994, Vol. 8(2), P. 380–387.
8. Mironenko O.O., Sosnin G.A., Eletsii P.M., Gulyaeva Y.K., Bulavchenko O.A., Stonkus O.A., Rodina V.O., Yakovlev V.A. A study of the catalytic steam cracking of heavy crude oil in the presence of a dispersed molybdenum-containing catalyst. *Petroleum Chemistry* 2017, Vol. 57(7), P. 618–629.
9. Golmohammadi M., Ahmadi S.J., Towfighi J. Catalytic cracking of heavy petroleum residue in supercritical water: study on the effect of different metal oxide nanoparticles. *Journal of Supercritical Fluids* 2016, Vol. 113, P. 136–143.
10. Fedyaeva O.N., Antipenko V.R., Vostrikov A.A. Conversion of sulfur-rich asphaltite in supercritical water and effect of metal additives. *Journal of Supercritical Fluids* 2014, Vol. 88, P. 105–116.
11. Fumoto E., Sato S., Takanohashi T. Characterization of an Iron-Oxide-Based Catalyst Used for Catalytic Cracking of Heavy Oil with Steam. *Energy and Fuels* 2018, Vol. 32(3), P. 2834–2839.
12. Соснин Г.А., Заикина О.О., Елецкий П.М., Яковлев В.А. Каталитический паровой крекинг гудрона в присутствии дисперсных катализаторов на основе различных металлов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018, Vol. 329(12), P. 145–154. [Sosnin G.A., Zaikina O.O., Eletsii P.M., Yakovlev V.A. Catalytic steam cracking of vacuum residue in presence of dispersed catalysts based on Mo, Ni, Fe, Co, Al metals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 2018, Vol. 329(12), P. 145–54. (In Russ.)]
13. Tang X.D., Chen X.D., Li J.J., Deng L.Y., Liang G.J. Experimental Study on Homogeneous Catalytic Upgrading of Heavy Oil. *Petroleum Chemistry* 2017, Vol. 57(12), P. 1018–1023.
14. Kayukova G.P., Foss L.E., Feoktistov D.A., Romanov G.V., Vakhin A.V., Petrukhina N.N. Transformations of hydrocarbons of Ashal'hinskoe heavy oil under catalytic aquathermolysis conditions. *Petroleum chemistry* 2017, Vol. 57(8), P. 657–665
15. Kondrasheva N.K., Kondrashev D.O., Rudko V.A., Shaidulina A.A. Effect of hydrocarbon composition on quality and operating characteristics of middle distillate fractions and low-viscosity marine fuels. *Chemistry and technology of fuels and oils* 2017, Vol. 53(2) P. 163–172.
16. Petrukhina N.N., Maksimov A.A. Physicochemical properties and performance characteristics of naphthenoaromatic jet and diesel fuels obtained by hydrotreating of highly aromatic fractions *Petroleum chemistry* 2018, Vol. 58(5), P. 347–374.